

基于改进模拟退火算法的多船会遇避碰决策

杨柏丞* 赵志垒

(大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对多船会遇态势下的船舶避碰行动决策问题, 提出一种基于改进的模拟退火算法的船舶转向避让的计算方法. 优化船舶碰撞危险度和航程损失的多目标函数, 利用改进的模拟退火算法, 在全局范围内筛选并获得最优解. 仿真结果表明, 改进的模拟退火算法相比传统算法, 在算法运行时间和精度上更优, 能够满足多船会遇态势下让路船转向避碰行动决策的有效性要求.

关键词: 多船会遇; 转向避碰; 模拟退火算法; 升温退火法
中图分类号: U675.96 **文献标志码:** A

Multi-ship encounter collision avoidance decisions based on improved simulated annealing algorithm

YANG Bai-cheng* ZHAO Zhi-lei

(Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In view of the decision problem of collision avoidance action of ships under the situation of multiple ships, a method of ship steering avoidance based on improved simulated annealing algorithm was proposed. Based on the multi-objective function optimization of ship collision risk and voyage loss, the optimal solution of the global range was obtained by using the improved simulated annealing algorithm. Simulation results show that the improved simulated annealing algorithm is superior to the traditional simulated annealing algorithm in the run time and accuracy of the algorithm, which can meet the effectiveness requirements of the decision making for the steering collision avoidance action under the situation of multiple ships.

Key words: multi-ship encounter; steering collision avoidance; simulated annealing algorithm; temperature rising annealing method

0 引言

国际海事组织一直致力于解决海上船舶碰撞和安全问题. 尽管这样, 仍有大量数据表明, 全球每年海上失事船舶中仍有超过 40% 是由船舶碰撞所致, 且其中近 80% 的事故是由人为决策失误造成的^[1-3]. 海上环境复杂多变, 船舶避让实时性强. 特别是在多船会遇情况下, 公约或法规未明确规定各船舶的避让措施和责任义务, 给操船者的避让决策制造了较大困难, 同时也增加了海上碰撞风险. 为此, 学术界在避碰决策模型方面开展了广泛研究, 如遗传算法^[4]、蚁群算法^[5]、粒子群算法^[6]、模拟退火算法^[7]等启发式进化算法, 并相继取得一定的成果. 但在多种算法的混合策略方面研究并不成熟, 无法真正全方位提升算法的计算精度和速度, 存在全局或局部收敛不足的缺陷, 算法的实时性也有待提升.

各种算法中, 传统的模拟退火算法具有较好的收敛性, 但当数据处理量增加时, 算法的寻优时间和结果误差也相应增加. 对该算法进行改进, 可使其具备更优良的性能, 更好解决多船会遇避碰决策问题. 模拟退火算法改进策略主要分为两大类: 一是对算法自身要素的改进, 包括提升温度、增加记忆功能和多次搜索策略^[8]等; 二是与其他优化算法结合, 提高算法在局部和全局搜索中的寻优能力^[9]. 本文将通过升温退火法, 将温度提高用全局扰动来激活各状态下接受概率的方式对传统的模拟退火算法进行改进. 在多船会遇态势下, 船舶转向避碰是采用频率最高的一种避碰方法, 本文仅考虑只有让路船单一采取转向避让行动而其他船保速保向的情况, 从多目标函数全局优化

收稿日期: 2017-11-01; 修回日期: 2017-11-29.

基金项目: 交通部海事局科技项目(80714003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132017137).

作者简介: 杨柏丞* (1985-), 男, 硕士, 讲师. E-mail: dmuybc@126.com.

问题出发,优化船舶碰撞危险度和航程损失的多目标函数,利用改进后的模拟退火算法,找出满足多目标函数和约束条件的全局范围内最优的转向避让措施。

1 转向避碰的多目标函数模型

本文将多船会遇态势下的转向避碰作为一类多目标函数优化问题,应用改进模拟退火算法,根据具体的会遇情况,找出满足目标函数和约束条件的最优转向避碰幅度,使得让路船采取转向避碰决策时满足^[10]:(1)与各目标船间的碰撞危险度尽量减小;(2)转向避碰幅度尽量小;(3)尽量减小转向到复航过程中的航程损失。

1.1 碰撞危险度子函数

本文研究基于开阔水域下多船会遇态势下的转向避碰幅度最优解计算。船舶碰撞危险度的影响因素较多,基于船舶领域和动界的概念,由碰撞几何原理可知,判断船舶间是否存在碰撞危险的主要方法是综合分析最小会遇时间和最小会遇距离。李丽娜等^[11]把以上两要素和两船距离、相对方位、船速比等因子作为基本评判参数,并综合自然条件和船舶特性对危险度的隶属度函数进行了修正。从海上避碰的实际情况出发,重点考虑上述因子,所得目标影响因素的论域是:

$$u = \{d, \theta, K, t_{CPA}, d_{CPA}\} \quad (1)$$

式中: d 为目标船与让路船距离; θ 为目标船相对让路船的方位; K 为让路船与目标船的船速比; t_{CPA} 为目标船与让路船最小会遇时间; d_{CPA} 为目标船与让路船最小会遇距离。

根据文献[12],各影响因子的模糊权重值分别取: $w_d = 0.14$ $w_\theta = 0.10$ $w_k = 0.08$ $w_{d_{CPA}} = 0.36$ $w_{t_{CPA}} = 0.32$ 。

$$\begin{cases} A = w_d, w_\theta, w_k, w_{d_{CPA}}, w_{t_{CPA}} \\ w_d > 0, w_\theta > 0, w_k > 0, w_{d_{CPA}} > 0, w_{t_{CPA}} > 0 \\ w_d + w_\theta + w_k + w_{d_{CPA}} + w_{t_{CPA}} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

目标评价矩阵如下:

$$B = \begin{bmatrix} r_d \\ r_\theta \\ r_{d_{CPA}} \\ r_{t_{CPA}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵中 r_d r_θ $r_{d_{CPA}}$ $r_{t_{CPA}}$ 分别为其下角标对应因子的目标危险隶属度。

研究结果表明,船舶间距离越小,船舶间碰撞危险度越大^[13]。由此,任意时刻船舶间距离的隶属度函数如下:

$$u(d) = \begin{cases} 1, & d \leq d_1 \\ [(d_2 - d) / (d_2 - d_1)]^2, & d_1 < d \leq d_2 \\ 0, & d > d_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: d_1 为设定的危险船舶间距离; d_2 为设定的安全船舶间距离。二者大小受航行区域的海况、能见度以及人为因素的综合影响。

隶属度函数中目标船相对让路船的方位角 θ 与船速比 K 有关:

$$u(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{1 + (\theta / \theta_0)^2}, & 0 \leq \theta < 180^\circ \\ \frac{1}{(\frac{360^\circ - \theta}{\theta_0})^2}, & 180^\circ \leq \theta < 360^\circ \end{cases} \quad (5)$$

$$\theta_0 = \begin{cases} 40^\circ, & K < 1 \\ 90^\circ, & K = 1 \\ 180^\circ, & K > 1 \end{cases} \quad (6)$$

其他各参数均相同时,船舶碰撞危险度随船速比增大而增加,令 $K \geq 0$, $W = 2 \rho^\circ \leq C < 180^\circ$,

$$u(K) = \frac{1}{1 + \frac{W}{K \sqrt{K^2 + 1} + 2K \sin C}} \quad (7)$$

$$u(d_{CPA}) = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{d_{CPA_0} - \lambda} \left(d_{CPA} - \frac{d_{CPA_0} + \lambda}{2} \right) \right] \\ 0 \end{cases} \quad (8)$$

在开阔水域条件下计算船舶的安全会遇距离时,不可忽略船舶领域的模糊边界FBD,计算如下:

$$\text{domain} = \begin{cases} 0.85 - \frac{\theta_t}{180^\circ} \times 0.2 \\ 1.8 - \frac{\theta_t}{180^\circ} \times 0.73 \\ 1.02 - \frac{360^\circ - \theta_t}{180^\circ} \times 0.57 \\ 0.85 - \frac{360^\circ - \theta_t}{180^\circ} \times 0.3 \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{FBD} = 0.267 D_s \quad (10)$$

在能见度降低的情况下,应通过加大 d_{CPA_0} 以扩大碰撞预警范围;在航经复杂水域或可航水域

受限时,应减小 d_{CPA0} :

$$d_{CPA0} = \begin{cases} K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot (D_S - FBD) \\ K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot (1 - 0.276) D_S \end{cases} \quad (11)$$

t_{CPA} 的隶属度函数和 d_{CPA} 与碰撞危险度的关系相近,表示为:

$$u(t_{CPA}) = \begin{cases} 1, & t_{CPA} < t_1 \\ \frac{t_2 - t_{CPA}}{t_2 - t_1}, & t_1 < t_{CPA} \leq t_2 \\ 0, & t_{CPA} > t_2 \end{cases} \quad (12)$$

$$t_1 = \frac{\sqrt{(d_1^2 - \lambda^2)}}{v_s}, \quad t_2 = \frac{\sqrt{(d_m^2 - d_{CPA0}^2)}}{v_s} \quad (13)$$

根据模糊综合评价方法得到目标危险度所有因素的综合评判结果,即:

$$CRI = A \cdot B = \begin{bmatrix} w_d & w_\theta & w_k & w_{d_{CPA}} & w_{t_{CPA}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_d \\ r_\theta \\ r_k \\ r_{d_{CPA}} \\ r_{t_{CPA}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

任意时刻的碰撞危险度 C_2 为:

$$CRI = w_d u_d + w_\theta u_\theta + w_k u_k + w_{d_{CPA}} u_{d_{CPA}} + w_{t_{CPA}} u_{t_{CPA}} \quad (15)$$

当船舶间无碰撞危险时, $CRI = 0$; 船舶间碰撞危险性最大时, $CRI = 1$; $CRI \in [0, 1]$, 船舶间碰撞危险性随 CRI 增大而增大. 确定目标船与让路船距离、目标船相对让路船的方位角、让路船与目标船的船速比、目标船与让路船最小会遇时间和目标船与让路船最小会遇距离共 5 个因子的隶属度函数,并综合考虑自然条件和船舶性能等对船舶碰撞危险度的隶属度函数进行修正.

$$f_1(x_i) = \max_{i=1}^N f_i(u_{d_i}, u_{\theta_i}, u_{k_i}, u_{d_{CPA_i}}, u_{t_{CPA_i}}) \quad (16)$$

式中: $f_1(x_i)$ 为第 i 个目标船与本船的碰撞危险度, $f_1(x_i) \in (0, 1]$; N 为目标船个数. 目标函数值越小,则碰撞危险度越小.

1.2 航程损失子函数

在船舶实际避碰操纵中,《国际海上避碰规则》中有“大幅度”的要求,转向幅度不小于 30° ;但同时,为避免航程损失过大,转向幅度应尽可能减小. 综合考虑以上两点,航程损失目标函数为:

$$f_2(x_i) = \frac{1}{60}(x_i - 30)(90 - x_i) \quad (17)$$

式中: x_i 为转向幅度,向右为“+”,向左为“-”; $f_2(x_i)$ 为航程损失函数, $f_2(x_i) \in (0, 1]$, $x_i \in [30, 90]$. 目标函数值越小,则转向幅度和航程损失越小.

为方便对目标函数进行寻优计算,假设上述多目标函数的权重线性分配为 7:3,则多船转向避碰目标函数为:

$$f = \sum_{i=1}^N \{1 - [0.7f_1(x_i) + 0.3f_2(x_i)]\} \quad (18)$$

2 基于改进模拟退火算法的多船会遇避碰决策

2.1 传统模拟退火算法基本原理

Metropolis 等^[14]最早提出模拟退火算法(SA)基础思想. Kirkpatrick^[15]引用加热和降温这种物理退火现象和过程的思路作为在全局优化问题中避免进入局部极值陷阱的有效方法,对多峰的目标函数,尤其对复杂的高维情况更加有效. 算法的物理退火过程包括加温、等温及冷却三个过程. 算法叙述为:任何初态 $i_0 \in S$, SA 算法每一步从当前状态 i 的领域 N_j 中随机产生下一个状态 j , $C_j \leq C_i$, 则接受新的当前状态为 j ; 否则按照概率 (通常是 $\exp\{-(C_j - C_i)/T\}$, 其中 T 为控制参数) 接受新的当前状态为 j , 持续找到状态 $I^* \in S$, $C_{j^*} \leq C_i, \forall i \in S$ 为止.

2.2 改进的模拟退火算法

理论上,控制参数 T 与物理退火中的温度参数作用相似, SA 算法在无穷大的时间里,可收敛得到全局最优解. 但在实际应用中,一般只是求得一个最满意的近似最优解以代替全局最优解.

为提高搜索速度和精度,使模拟退火算法具有相对更好的特性,本文采用升温退火法将温度适当提高来激活各状态的接受概率,以此达到缩短算法运行时间,降低寻优结果的离散性的目的.

改进流程如下:选定初始控制温度,产生一次随机扰动,用全局扰动的方式替代当前的扰动方式,采用多次搜索策略在可行域空间内找到一个解. 当且仅当 $f(i) < f(j)$ 时,接受新解,同时通过升温函数来增加温度,初始解变为 j , 否则仍为 i , 满足升温条件下的终止准则,输出所得温度和初始解. 在新的状态下控制初始温度和初始解开始退火,每接受一次新解时初始温度都在温度函数下变化.

2.3 改进算法性能测试

本文采用 Schaffer 函数这一典型的测试函数对改进的算法性能进行测试. 该函数存在很多局部最优的陷阱, 很难找到全局最优值, 故对算法的各种性能, 基本上均可以测试得到.

Schaffer 函数:

$$f(x,y)=0.5+\frac{(\sin\sqrt{x^2+y^2})^2-0.5}{(1+0.001(x^2+y^2))^2}$$
 (19)

式中: $-5\leq x,y\leq 5$. 该函数具有无数个极小值点, 在(0,0)处取得最小值. 该函数具有强烈震荡的形态, 所以很难找到全局最优值.

本文的两种算法均采用实数编码, 初始参数中初始温度设定为 800, 衰减参数为 0.988, 迭代次数设为 800. 利用 MATLAB 对该两种算法进行仿真试验, 并对该测试函数进行一次寻优分析, 寻优结果和迭代曲线分别如图 1、2 所示.

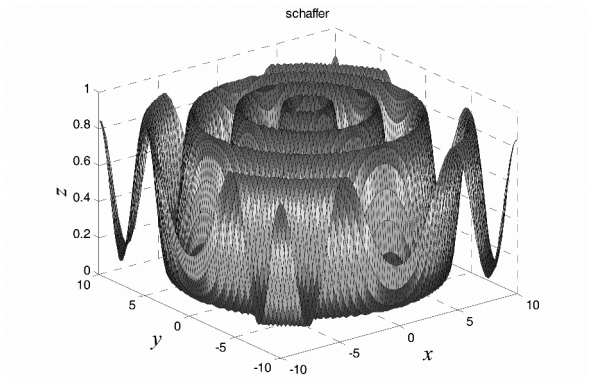


图 1 对 f 的一次寻优结果
Fig. 1 Evolution for f in an iteration

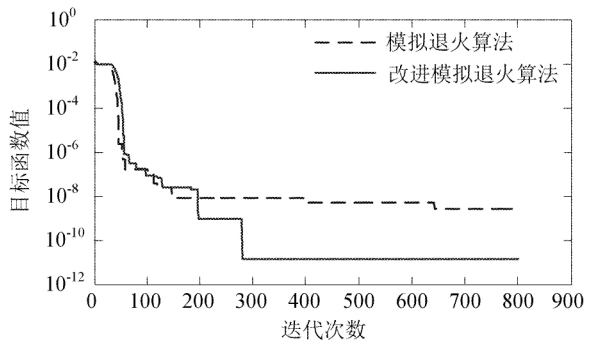


图 2 测试函数迭代曲线
Fig. 2 Iteration curve for test function

由图 1 的寻优结果可知, 改进的模拟退火算法可在设定代数内全部找到最优解, 具有很强的跳出局部最优的能力, 证明在寻优能力上改进后的模拟退火算法较传统的更强大. 由图 2 可以大概看出改进的模拟退火算法的寻优过程, 收敛速

度明显快于模拟退火算法. 从对测试函数优化的综合性能来看, 改进的模拟退火算法适用于不同特点的复杂函数的优化, 且具有一定的鲁棒性, 其综合性能优于其他算法.

3 转向避碰幅度仿真和结果分析

3.1 仿真实例

假定本船以航向000°、航速 15 kn 航行. 此时海上能见度良好, 船舶操纵者驾驶状况良好(取 $K_1=1, K_2=1, K_3=1$). 与三艘目标船(TS₁, TS₂, TS₃)形成多船会遇态势, 存在碰撞危险且本船为让路船, 采取转向避碰决策. 本船与目标船的会遇态势如表 1 所示.

表 1 本船与多目标船会遇态势
Tab. 1 multi-ship encounter situation

运动参数	目标船		
	TS ₁	TS ₂	TS ₃
航速/ kn	12.4	16.0	18.3
航向/(°)	280	320	343
距离/ n mile	5.1	5.8	4.5
方位/(°)	046	084	140
DCPA/ n mile	0.39	-0.35	-2.34

3.2 结果分析

结果表明, 本船作为让路船在该会遇态势下应向右转向约 37.5°. 改进的模拟退火算法对于转向目标函数的寻优结果更小, 可知改进的模拟退火算法计算量更小, 更容易在约束的可行域空间内找到最优解. 图 3 为各代最优解, 即本船最优转

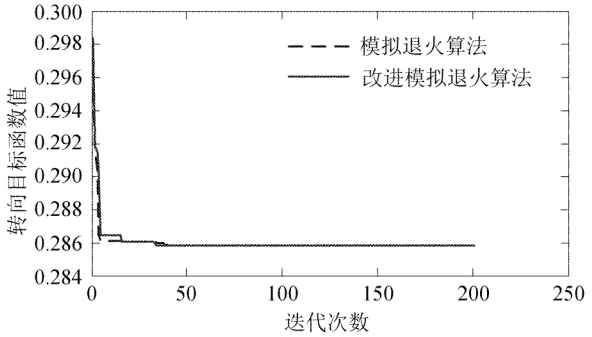


图 3 最优解迭代变化
Fig. 3 Optimal evolution for iteration

向避碰幅度. 最优解收敛于某个固定值, 其中, 代表改进模拟退火算法的实线在 50 代以内可以迅速趋于稳定, 算法执行耗时 6~10 s, 收敛速度快, 能够保证多船避碰决策的实时性. 而传统算法在到达第 50 代时, 仍未稳定, 也自然比改进算法更

加耗时. 转向后, 本船对各目标船(按 TS_1 、 TS_2 、 TS_3 的顺序) 的碰撞危险度分别为 (0.3338, 0.4346, 0.3737). 船舶间碰撞危险度均明显减小, 能够有效避免碰撞.

4 结论

改进的模拟退火算法能够提高算法寻优结果的实时性和可靠性. 综合考虑影响船舶转向避碰幅度的多种因素, 将其应用到多船会遇情况下船舶转向避碰措施决策的研究中, 建立合理的多目标函数, 并考虑到各种因素之间的差异, 对目标函数进行权重分配, 使模型更加符合航海实际. 结果表明: 该算法可行、有效, 能满足操船者在实船避让中实时决策的要求, 为船舶驾驶员在转向避碰决策时提供参考; 计算时间较传统算法有所提高, 但无法满足船舶自动避碰和自动舵的控制要求.

参考文献(References):

- [1] AHNA J Y, RHEE K P, YOU Y J. A study on the collision avoidance of a ship using neural networks and fuzzy logic [J]. Applied Ocean Research, 2012(37): 162-173.
- [2] 江立军, 郑凯, 王国峰, 等. 现代船舶避碰系统研究进展 [J]. 上海船舶运输科学研究报, 2015, 38(1): 7-12. JIANG L J, ZHENG K, WANG G F, et al. A review of ship collision avoidance systems [J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2015, 38(1): 7-12. (in Chinese)
- [3] ZOU X H, NI T Q. Applied research of genetic algorithm in the amplitude decision of ship steering and collision avoidance [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2006(3): 66-69.
- [4] WANG D Y, LIU Y A. Studies on turning angle to avoid collision between ships with PSO arithmetic [J]. Computer Engineering and Design, 2009, 14: 3380-3382.
- [5] 刘以安, 刘静, 吴洁, 等. 模拟退火算法在船舶转向避碰幅度决策中的应用 [J]. 中国造船, 2007(4): 53-57. LIU Y A, LIU J, WU J, et al. The application of simulated annealing algorithm in studying the course alteration of ship [J]. Shipbuilding of China, 2007(4): 53-57. (in Chinese)
- [6] HASEGAWA K, FUKUTO J. An intelligent ship handling simulator with automatic collision avoidance function of target ships [C]// INSLC 17-International Navigation Simulator Lecturers' Conference, 2012: F23-1-10.
- [7] 李丽娜, 杨神化, 曹宝根, 等. 船舶避碰智能决策自动化研究 [J]. 集美大学学报(自然科学版), 2006(2): 188-192. LI L N, YANG S H, CAO B G, et al. A summary of studies on the automation of ship collision avoidance intelligence [J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2006(2): 188-192. (in Chinese)
- [8] 石利平. 模拟退火算法及改进研究 [J]. 信息技术, 2013, 37(2): 176-178. SHI L P. Research on simulated annealing algorithm and improvement [J]. Information Technology, 2013, 37(2): 176-178. (in Chinese)
- [9] 张慕雪, 张达敏, 杨菊靖, 等. 基于捕食搜索策略的模拟退火优化算法 [J]. 计算机应用研究, 2018(9): 1-2. ZHANG M X, ZHANG D M, YANG J Q, et al. Simulated annealing algorithm based on predatory search strategy [J]. Application Research of Computers, 2018(9): 1-2. (in Chinese)
- [10] BUKHARI A C, TUSSEYEVA I, LEE B G, et al. An intelligent real-time multi-vessel collision risk assessment system from VTS view point based on fuzzy inference system [J]. Expert Systems with Applications, 2013: 1220-1230.
- [11] 胥文, 胡江强, 尹建川, 等. 基于模糊理论的船舶复合碰撞危险度计算 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39(13): 78-84. XU W, HU J Q, YIN J C, et al. Composite evaluation of ship collision risk index based on fuzzy theory [J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(13): 78-84. (in Chinese)
- [12] KOIKE T, OKAZAKI T. Development of ship simulator system for designing auto-pilot [C]// World Automation Congress (WAC). Kobe [s. n.], 2010: 1-5.
- [13] 于家根, 刘正江, 卜仁祥, 等. 基于拟态物理学优化算法的船舶转向避碰决策 [J]. 中国航海, 2016(1): 36-38. YU J G, LIU Z J, BU R X, et al. Collision-avoiding course alteration optimization with artificial physics algorithm [J]. Navigation of China, 2016(1): 36-38.
- [14] 朱颢东, 钟勇. 一种改进的模拟退火算法 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(6): 32-35. ZHU H D, ZHONG Y. A kind of renewed simulated annealing algorithm [J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(6): 32-35. (in Chinese)
- [15] 周鑫, 马跃, 胡毅. 求解车间作业调度问题的混合遗传模拟退火算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(2): 370-374. ZHOU X, MA Y, HU Y. Mixed genetic algorithm and simulated annealing algorithm for solving job shop scheduling problem [J]. Journal of Chinese Mini-Micro Computer Systems, 2015, 36(2): 370-374. (in Chinese)